第 37 卷第 8 期
2017 年 4 月
生 态 学 报
ACTA ECOLOGICA SINICA
Vol.37,No.8
Apr.,2017

DOI: 10.5846/stxb201511302400
刘亚琦,刘加珍,陈永金,靖淑慧,冯若昂.孔雀河下游断流河道的环境特征及物种间关系.生态学报,2017,37(8):2706-2718.
Liu Y Q, Liu J Z, Chen Y J, Jing S H, Feng R A.Environmental characteristics and interspecific associations in the lower reaches of the Kongque River. Acta Ecologica Sinica,2017,37(8):2706-2718.

孔雀河下游断流河道的环境特征及物种间关系

刘亚琦,刘加珍*,陈永金,靖淑慧,冯若昂
聊城大学环境与规划学院, 聊城 252000

摘要:基于孔雀河下游断流河道的环境因子和植被样地数据,采用聚类与 CCA 排序法,分析了生境的退化特征以及物种间的相互关系,结果表明:1)断流河道退化生境分为绿洲-荒漠过渡类型、轻度荒漠化类型和盐土荒漠化类型。绿洲-荒漠过渡类型地下水位低、盐分含量相对较低,植被盖度相对较高,土壤维持着原砂质壤土,为潜在退化型;轻度荒漠化类型地下水位、土壤质地与含盐量与前者基本相同,土壤未明显退化,但植被盖度低于 10%,植物种类与个体数目都较低,属于轻度退化型;盐土荒漠化类型地下水位高、盐分含量高,土壤机械组成中砂粒比重较大、无建群种幸存,属于重度退化型。2)绿洲-荒漠过渡类型总体联结性为显著正联结,正负联结比小于 1,生态系统表现为建群种维系物种关系的不稳定状态;轻度荒漠化类型总体联结性为不显著负联结,正负联结比小于 1,表现出生态系统进入退化演替的阶段;盐土荒漠化类型总体联结性为显著正联结,正负联结比大于 1,表现出重度退化群落的种间平衡状态,物种间以达到稳定共存,其中,真盐生植物对这种平衡的维持起着重要的作用。3)CCA 排序表明,绿洲-荒漠过渡类型形成以胡杨为中心的种间正联结,幸存于盐分适中、水分养分相对较高的生境;轻度荒漠化类型,形成以多枝柽柳与刚毛柽柳相互依存的不显著负联结,幸存于土壤养分、水分相对较低的生境;盐土荒漠化类型形成以盐爪爪、盐节木、盐穗木等真盐生植物维系的显著正联结,幸存于土壤贫瘠、地下水位浅、盐分含量高、沙化严重的生境。
关键词:孔雀河;断流河道;种间关系;环境特征

Environmental characteristics and interspecific associations in the lower reaches of the Kongque River

LIU Yaqi, LIU Jiazhen*, CHEN Yongjin, JING Shuhui, FENG Ruoang
College of Environmental and Planning, Liaocheng University, Liaocheng 252000, *China*

Abstract: The interaction between plants and the environment, especially the interspecific associations in certain ecosystems, is an important ecological topic. The Kongque River originates from Boston Lake and flows through the east of the Taklamakan Desert; it plays a critical role in supplying water and ecological stability to the South Korla and Lop Nur regions. Owing to climate change, and excessive human exploitation, water availability has become increasingly limited, resulting in severe ecological degradation in the lower reaches of the Kongque River. Therefore, to evaluate the degree of ecological degradation and potential restoration probability in the lower reaches of the Kongque River, this study focused on the interspecific associations of the degraded desert riparian ecosystem by analyzing the groundwater, soil salinity, soil nutrients, and vegetation in 2013. The results showed that: 1) Based on the variation in groundwater depth, soil salinity, soil type, vegetation coverage, species richness, and species diversity, the longitudinal habitats in the lower reaches of the Kongque River could be divided into three types: oasis-desert ecotone, intermediate desertification zone, and saliniferous desertification zone. In the oasis-desert ecotone, the groundwater depth was soil salinity was low, *Populus euphratica* was the

基金项目:国家科技支撑计划课题(2014BAC15B02);国家自然科学基金(40901276,40871239);中国博士后特别资助项目(2013T60905);中国博士后基金(2012M512058)

收稿日期:2015-11-30; **网络出版日期**:2016-10-29

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: liujiazhen@ lcu.edu.cn

constructive species in plant community, vegetation coverage varied from 9.04% to 21.10%, and the soil was mainly formed by sandy loam. The groundwater depth, soil salinity, and soil texture in the intermediate desertification zone were similar to those in the oasis-desert ecotone. However, the vegetation coverage, species diversity, and species biomass were lower than those in the oasis-desert ecotone. *Tamarix ramosissima* Ledeb. and *T. hispida* Willd. were the constructive species of the plant community. The groundwater depth and soil salinity in the saliniferous desertification zone were the highest among the three zones, and sand grain factor affecting the soil. Owing to the severe environmental factors, *P. euphratica* and *Tamarix* spp. could not survive; therefore, the desert halophytes, such as *Halostachys caspica* C. A. Mey, and *Kalidium foliatum* Moq. were the constructive species in the plant community. 2) Overall, inter-specific associations between different species in the lower Kongque River were not significant. Most of the pairwise associations in the oasis-desert ecotone were positive. Nevertheless, associated coefficients were <1, which indicated that the ecological stability of the ecotone was vulnerable. The pairwise association in the intermediate desertification zone was not significantly negative, and the association coefficients were also <1. This finding implied that the environmental factors were highly heterogeneous, and the ecosystem was deteriorating. The pairwise association in the saliniferous desertification zone was significantly positive, and most of associated coefficients were >1, for all the survival species in this zone were euhalophytes. Consequently, the ecological degradation in this zone was the most serious. 3) A canonical correspondence analysis showed that in the oasis-desert ecotone, the key species, *P. euphratica* showed a positive association with other species, the habitat expressed characteristics of moderate soil salinity, high nutrients, and suitable soil moisture. Unlike the oasis-desert ecotone, associations among species in the intermediate desertification zone were not significant, the two key species, *T. hispida* and *T. ramosissima*, were interdependent, and the habitat was characterized as having lower soil nutrient and water contents. In the saliniferous desertification zone, associations among euhalophytes such as *Kalidium foliatum*, *Halocnemum strobilaceum*, and *Karelina caspica* were significantly positive, and the characteristics of the habitat were barren soil, a shallow groundwater level, and high salt salinity.

Key Words: Kongque River; dried-up riverbed; interspecific association; environmental characteristics

植物与环境的相互关系是生态学的重要研究方向。天然植被作为干旱荒漠区防风固沙的主体,在抑制荒漠化过程中起着重要的生态作用,同时直接决定着环境的优劣[1-2]。植物群落内,各物种间存在着复杂的关系,可以用物种间的联结性来衡量,种间联结性对干旱荒漠区生态环境状况产生影响,反之,环境状况的优劣程度也会影响物种间的联结关系[3-4]。近年来,关于植物群落种间联结的研究,以研究某特定群落的种间联结性较多,如芦苇群落、牛奶子群落和霸王群落等,得出正负联结比、总体联结性或推出群落所处的演替阶段[5-7];不同样方尺度对种间联结也有一定的影响,不同种对所表现出的联结的最小样方尺度不同[8-9]。然而关于荒漠河岸林地区群落衰退与物种间关系的研究较少,尤其是关于孔雀河下游植被环境特征与物种间关系的研究尚未见报道。

孔雀河是塔里木河下游生态输水的重要水源,兼备着本流域内生产生活的供给,提供河灌区的农业用水,以及流域内生态环境维护等多项功能。20 世纪 90 年代末,由于人为因素影响,孔雀河流程不足 180 km,后流经大西海子水库之后,自库尔勒市普惠水库以下近 600 km 河道便季节性断流[10-11]。为了分析孔雀河下游荒漠河岸植被的退化程度及生态输水条件下的潜在恢复程度,本研究在样地调查的基础上,结合孔雀河下游土壤环境因子和地下水位指标,研究荒漠河岸林退化过程的物种种间关系特征,用以阐明环境退化条件下,群落物种间的生存选择,对荒漠河岸林衰退群落植被恢复与植被重建具有重要参考价值。

1　研究区概况

孔雀河源于博斯腾湖,位于塔里木河盆地东北部,原注入罗布泊全长 785 km,流域辖库尔勒市、尉犁县、

兵团农二师 28 团、29 团、30 团等单位[11-13]。孔雀河流域深居欧亚大陆腹地,远离海洋,属于大陆干旱性气候,多年平均降水量 47.3—75.0 mm,集中于 6—8 月份,多年平均蒸发量 1887—2777 mm[14]。土壤母质含盐量高,河岸土壤次生盐渍化严重[15]。植被组成为杨柳科、柽柳科、豆科、菊科、藜科等,旱生和耐盐碱是孔雀河流域植物的突出特征[12],流域唯一的乔木为胡杨(*Populus euphratica* Oliv.),灌木主要有多枝柽柳(*Tamarix ramosissima* Ledeb.)、刚毛柽柳(*Tamarix hispida* Willd.)、盐穗木(*Halostachys caspica* (Bieb.) C.A.Mey.)、盐爪爪(*Kalidium foliatum* (Pall.) Moq.)等,草本植物主要有花花柴(*Karelina caspica* (Pall.) Less.)、猪毛菜(*Salsola collina* Pall.)、胀果甘草(*Glycyrrhiza inflate* Bat.)等。

2 研究方法

2.1 样地布设与数据采集

在影像分析与实地踏勘的前提下,于 2013 年 7 月 26 日—7 月 31 日选择能反映植被退化不同状态的代表性 3 个监测断面(图 1),每个断面垂直于河道距离 100、200、400、600、800 m 处,设置 50 m×50 m 固定样地,并划分成 4 个 25 m×25 m 的样方,样方共计 60 个。每个样方测定各乔灌木的株高、冠幅、基径或胸围,统计种类与个体数目;同时记录草本植物的种类、数量、高度与盖度。每个样地旁边,布设地下水监测井,获取地下水埋深数据,并以 GPS 进行定位,记录每个样地的经纬度。研究区物种统计表如表 1 所示,其中乔木 1 种,灌木及半灌木 9 种,草本植物 6 种(表 1)。

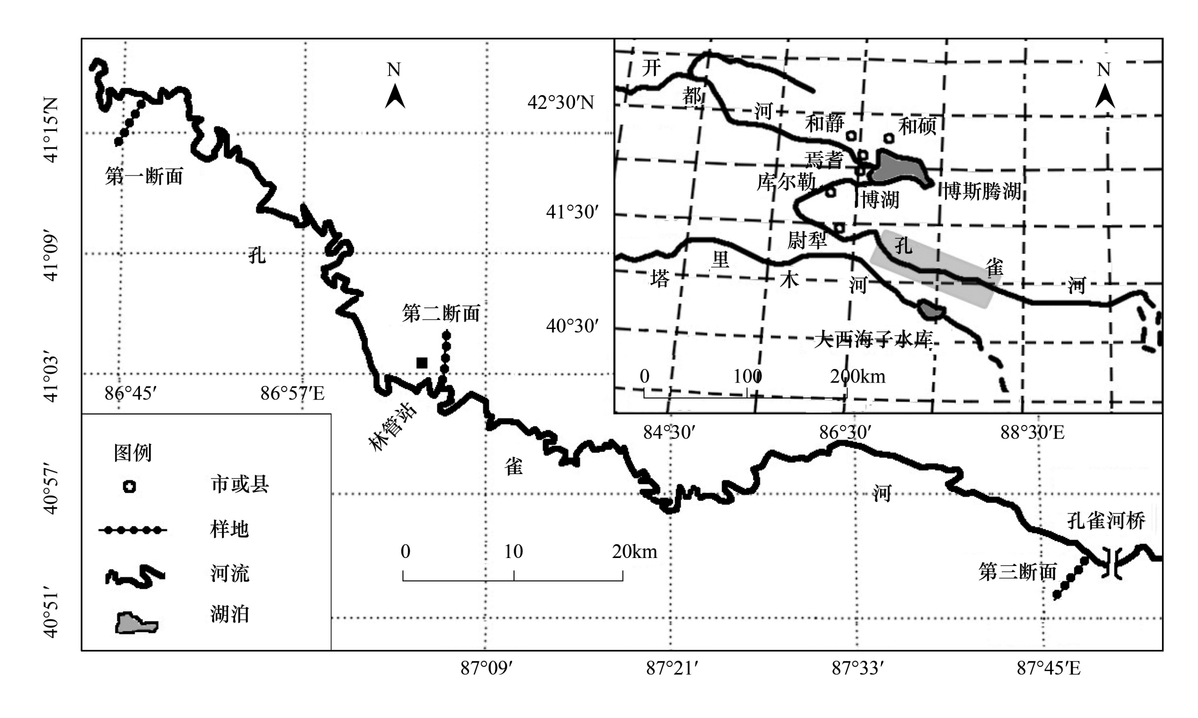


图 1 孔雀河下游监测样地示意图

Fig.1 Distribution of investigation sections in the lower reaches of Kongque River in China

在每个样地中心挖取土壤剖面,采用分层取样的方法,第一、第二断面分为 0—5、5—15、15—30、30—50、50—80、80—120、120—170 cm 的 7 层,第三断面土壤颗粒粒径粗大,沙化严重影响,在 100、200、400 m 和 600 m 处的样地仅能取 0—15 cm 和>15 cm 两层土样。将土样带回实验室,经风干、去杂、磨细、过筛后,测定土壤总盐、速氮、速钾、速磷、有机质、全氮、全磷、全钾。其中,土壤总盐采用离子加合法(离子色谱仪(美国戴安 ICS-5000)、电感耦合等离子发射光谱(美国安捷伦 735 ICP-OES))、土壤氮采用碱解蒸馏法(FOSS 全自动定氮仪)、土壤磷采用分光光度计法(DU800 紫外分光光度计)、土壤钾采用原子吸收法、采用重铬酸钾容量法-外加热法测定土壤有机质、采用烘干法测土样含水量、用酸度计测定土壤 pH 值(水土比为 5∶1),用

Marlven2000 激光粒度仪进行土壤粒度的测定,具体操作过程见文献[16]。样品检测在中国科学院新疆生态与地理研究所实验室完成。

表 1　孔雀河下游主要植物名录表

Table 1　List of the most species in the lower reaches of Kongque River

植物种 Species	编号 Number	植物种 Species	编号 Number
胡杨 *Populus euphratica* Oliv.	S1	花花柴 *Karelina caspica* (Pall.) Less.	S9
黑刺 *Lycium ruthenicum* Murr.	S2	刚毛柽柳 *Tamarix hispida* Willd.	S10
白刺 *Nitraria sibirica* Pall.	S3	多枝柽柳 *Tamarix ramosissima* Ledeb.	S11
猪毛菜 *Salsola collina* Pall.	S4	胀果甘草 *Glycyrrhiza inflate* Bat.	S12
刺莎蓬 *Salsola ruthenica* lljin.	S5	甘草 *Glycyrrhiza uralensis* Fisch.	S13
盐穗木 *Halostachys caspica* (Bieb.) C.A.Mey.	S6	铃铛刺 *Halimodendron halodendron* (Pall.) Voss.	S14
盐爪爪 *Kalidium foliatum* (Pall.) Moq.	S7	牛皮消 *Cynanchum sibiricum* Willd.	S15
盐节木 *Halocnemum strobilaceum* (Pall.) Bieb.	S8	芦苇 *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.	S16

2.2　数据分析

2.2.1　联结性分析

利用方差比率法(*Variance Ratio*)考察群落总体联结性[17]。在独立性零假设条件下,*VR* 期望值为 1,当 $VR>1$ 时,表明物种间呈现出净的正联结;当 $VR<1$ 时,表明物种间存在净的负联结,当 $VR=1$ 时,即符合所有种间无联结性的零假设。采用统计量 *W* 来检验 *VR* 偏离 1 的显著程度,$W=(VR)\times N$。若种间联结不显著,则 *W* 落入由下面χ^2分布给出的界限内的概率有 90% $\chi^2_{0.95,N}<W<\chi^2_{0.05,N}$。总体联结性公式如下:

$$VR = S_T^2/\delta_T^2 \tag{1}$$

其中:

$$\delta_T^2 = \sum P_i(1-P_i) \qquad P_i = n_i/N \tag{2}$$

$$S_T^2 = \frac{1}{N}\sum_{j=1}^{n}(T_j - t)^2 \tag{3}$$

式中,*S* 为总物种数,*N* 为总样方数,T_j 为样方 *j* 内出现的研究物种总数,n_i 为物种出现的样方数,*t* 为样方中种的平均数,$t=(T_1+T_2+\cdots+T_n)/N$。

采用 Yates 的连续矫正χ^2公式[18]计算植物种对间的联结性。其中,当 $ad>bc$ 时为正联结,$ad<bc$ 时为负联结。若$\chi^2>3.841$($0.01<P<0.05$),则表示种对间种间联结性显著。当$\chi^2>6.635$($P<0.01$),表示种对间联结性极显著。种对间联结性公式如下:

$$\chi^2 = \frac{(|ad-bc|-0.5n)^2 n}{(a+b)(a+c)(b+d)(c+d)} \tag{4}$$

式中,*n* 为取样总数,*a* 为两个物种均出现的样方数,*b*,*c* 分别为仅有 1 个物种出现的样方数,*d* 为 2 个物种均未出现的样方数。

2.2.2　聚类与排序

采用聚类分析研究断流河道退化的环境类型。以地下水埋深、0—15 cm 处含水量、pH 值、总盐、有机质 5 项环境指标和物种盖度、Shannon-Wiener 多样性指数、Margalef 丰富度指数 3 项植被指标标准化处理后作为分析指标,具体处理过程见文献[19-20]。

采用 CCA 排序分析植物类群与环境的关系,并分析各类群物种与类群中优势物种的种间联结状况。以物种盖度为植被数据矩阵,以地下水埋深、0—15 cm 土壤含水量、pH 值、总盐、有机质、全磷、全氮、全钾、速效磷、速效氮、速效钾为环境因子数据矩阵,用公式 $x'_i=(x_i-x_{min})/(x_{max}-x_{min})$ 对数据进行标准化处理,具体处理过程见文献[21]。CCA 排序图以空心三角形表示物种,带实心箭头的线段表示环境因子,做出某一物种到环境因子射线的垂直投影点,垂直投影点与环境因子箭头越近,表示物种在该环境因子较大时具有最适值[22]。物

种间的距离代表物种间的亲疏关系,距离越短表明两物种分布差异性越小,对环境的适应性就越相似。

3 结果与分析

3.1 断流河道生境退化类型

由孔雀河下游各样地间的相异系数和树状聚类图可知(图 2),以聚类距离 14 为标准,孔雀河断面 15 个样地分为Ⅲ类:第Ⅰ类样地包括样地 1—3、样地 5、样地 7 和样地 9,这些样地绝大部分分布在第一断面,第Ⅱ类包括样地 4、样地 6、样地 8 和样地 10,绝大部分分布在第二断面,第Ⅲ类以第三断面的样地为主。由此可见,3 个断面能较好地反映 3 种生境类型。

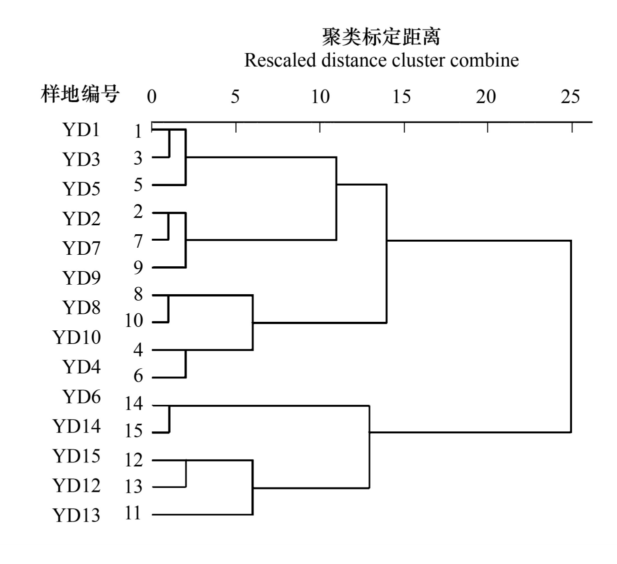


图 2 孔雀河下游样地聚类分析树状图

Fig.2 Cluster dendrogram of the plots in the lower reaches of Kongque River

YD 代表样地 expressed yields

对 3 种生境类型的植被和环境特征对比分析可知(图 3),第Ⅰ类的盖度、多样性指数及丰富度指数均高于第Ⅱ类,且第Ⅰ类盖度处于绿洲向荒漠化过渡的临界阈值 10%—20%[23]之间,第Ⅱ类盖度明显低于此阈值,植被退化较严重;第Ⅲ类生境的盖度和多样性指数虽然较大,但土壤沙化严重,对环境起主控作用的先锋种胡杨死亡率高,仅近河道以真盐生植物盖度较大,但健康状态下的荒漠河岸建群植物已无踪迹,表现出严重退化状态。分析环境特征可知,受北山输水管道漏水的影响,第三断面地下水埋深较浅(图 3),平均地下水埋深达 2.52 m,在强烈蒸发作用下土壤总盐含量较高(图 3),土壤有机质的含量远远小于第Ⅰ类和第Ⅱ类生境类型(图 3)。

依据以上分析,将孔雀河下游生态退化类型划分为 3 类:

第Ⅰ类为绿洲-荒漠过渡类型。此类植被盖度在 9.04%—21.10%之间,物种多样性指数在 0.61—1.62 之间、丰富度指数在 0.57—1.21 之间,物种主要以胡杨、猪毛菜、芦苇、刺莎蓬和甘草等为主;平均地下水埋深达 6 m 以下,土壤有机质含量在 4.13—18.06 g/kg 之间。处于绿洲向荒漠的过渡状态,植被和土壤尚未出现明显退化,处于潜在退化状态。

第Ⅱ类为轻度荒漠化类型。此类型植被盖度低于 10%,物种多样性指数在 0.68—1.09 之间、丰富度指数在 0.15—0.85 之间,物种以刚毛柽柳、多枝柽柳、黑刺等灌木为主,胡杨个体数目较第Ⅰ类生境要少。平均地下水埋深达 6.98 m,土壤有机质含量在 2.72—16.88g/kg 之间。此类型植被已出现退化现象,土壤退化特征尚不明显,处于轻度退化状态。

第Ⅲ类为盐土荒漠化类型。此类植被盖度近河道 400 m 以内较高,在 15%以上,远河道 600、800 m 处不到 3%;物种多样性指数在 0.89—1.64 之间、丰富度指数在 0.50—1.07 之间,物种以盐节木、盐穗木、盐爪爪、花花柴等真盐生的灌木和草本为主,无胡杨活体。平均地下水埋深达 2.52 m,土壤有机质含量在 0.82—2.09g/kg之间。此生境类型土壤退化显著,处于重度退化状态,无建群物种胡杨幸存。

3.2 不同退化类型的环境因子特征

3.2.1 地下水埋深

孔雀河下游 3 种退化类型的地下水埋深变化如图 4 所示,绿洲-荒漠过渡类型从距河道 100 m 到 800 m 处,地下水埋深由 7.1 m 减小到 5.6 m;轻度荒漠化类型地下水埋深在 6.4—7.4 m 之间,地下水位低;盐土荒漠化类型地下水埋深在 2.2—3.0 m 之间,远小于前两种生境类型,为高地下水位。总体来看,绿洲-荒漠过渡类

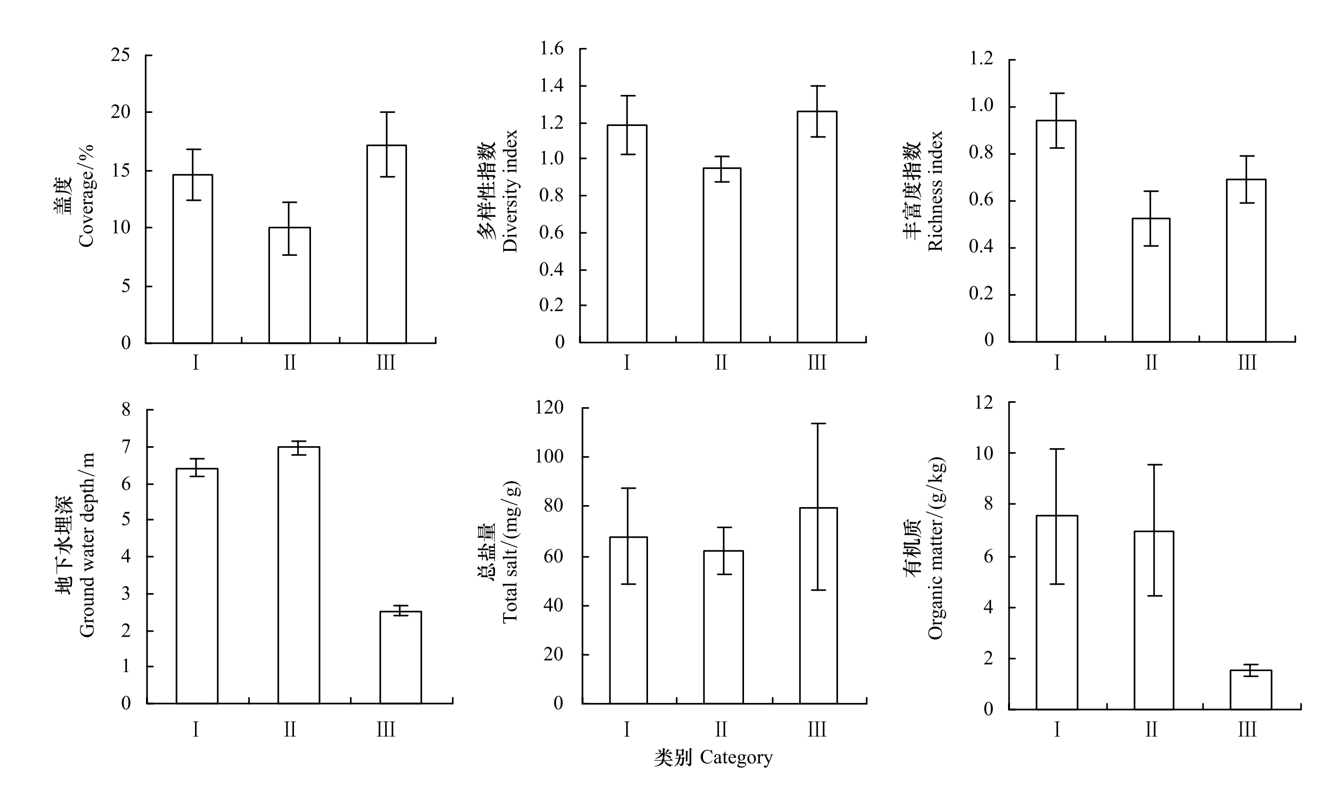


图 3　3 种退化类型的植被与环境因子特征

Fig.3　Characteristics of the vegetation and environmental factors in three degenerated types

Ⅰ表绿洲-荒漠过渡类型 expressed Oasis-desert ecotone; Ⅱ表轻度荒漠化类型 expressed Intermediate desertification zone; Ⅲ表盐土荒漠化类型 expressed Saliniferous desertification zone

型距河道近处,地下水位低,随着距河道距离的增加,地下水位变高。轻度荒漠化类型和盐土荒漠化类型各样地观测井地下水埋深的差异不大,与距河道距离的远近无明显关系。

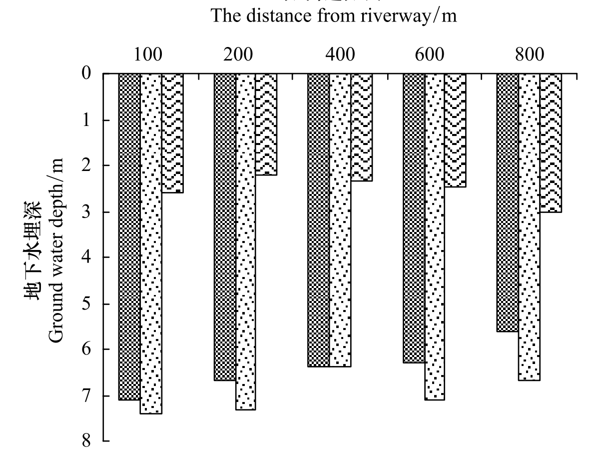


图 4　不同退化类型地下水埋深变化

Fig.4　The change of ground water depth between different the degenerate sections

3.2.2　土壤盐分

如图 5 所示,3 种退化类型土壤总盐的垂直分布差异较为明显:总含盐量在垂直方向上呈逐渐降低的趋势,表层含量较大,深层盐分较小;在 0—50 cm 土层间土壤盐分变化剧烈,50 cm 以下则相对平稳。其中,绿洲-荒漠过渡生境各样地土壤剖面盐分表现出越接近表层含量越高的特点,以 5—15 cm 土层盐分含量最高。轻度荒漠化类型在距河道 100、200 m 和 400 m 处土壤剖面 0—5 cm 盐分含量最高,距河道 600 m 和 800 m 样地土壤剖面 5—15 cm 深度含盐量最高;盐土荒漠化类型因采样条件限制,仅分析距河道 800 m 处,土壤剖面盐分含量呈现出次表层积聚的特点。相比较而言,总盐量的最大值出现在盐土荒漠类型,说明该类型涉及的盐分波动范围要大于绿洲-荒漠过渡类型和轻度荒漠化类型。

3.2.3　土壤养分与颗粒组成

以 0—15 cm 土层养分含量与全国第二次土壤普查养分分级标准[24]进行对比,由表 2 得出,盐土荒漠化

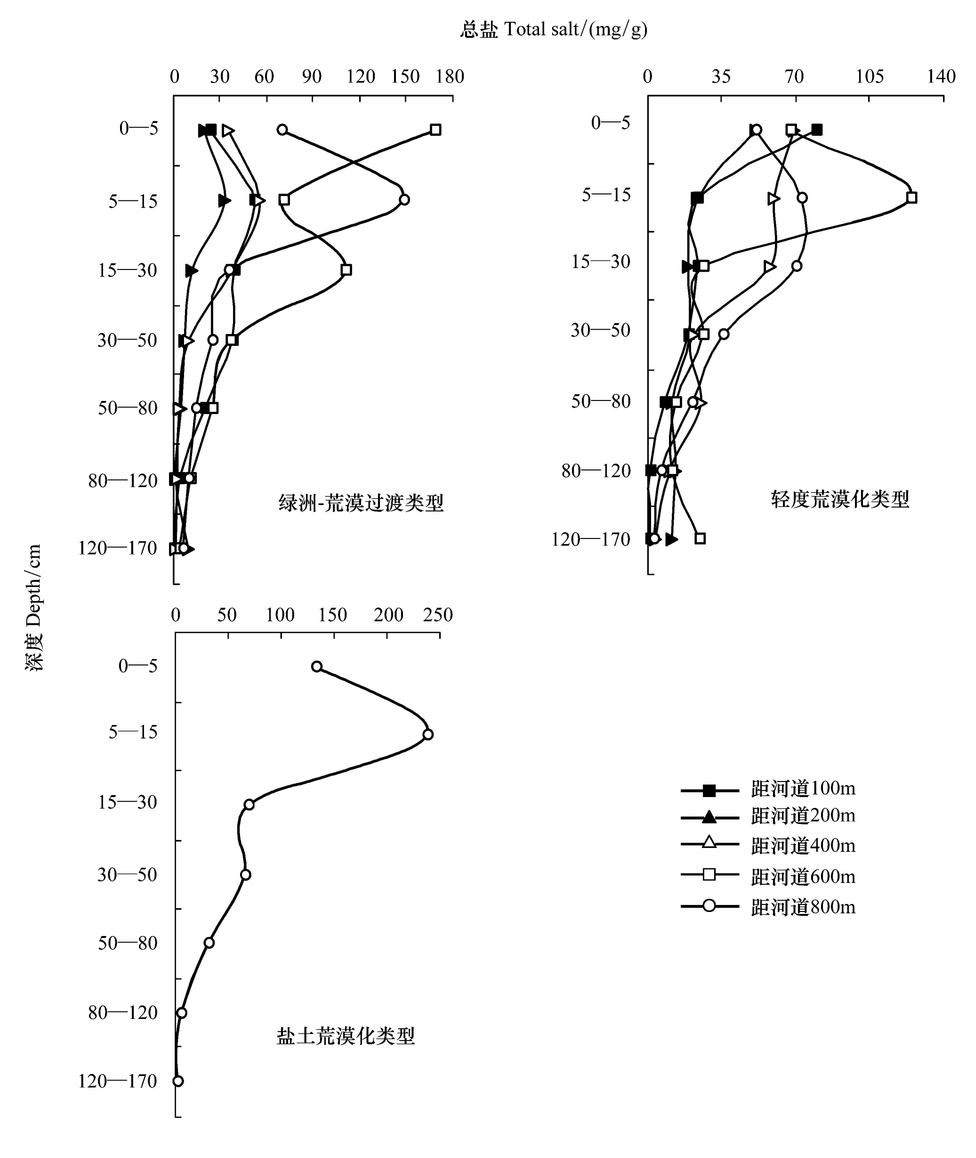


图 5 不同退化类型土壤总盐含量垂直分布图

Fig.5 Vertical distribution of total salt in soil between different the degenerate sections

类型有机质的含量明显小于绿洲-荒漠过渡类型和轻度荒漠化类型。3 种生境全氮含量均小于 0.5 g/kg,速效氮含量均低于 60 mg/kg,速效磷含量大多数低于 10 mg/kg,全磷和钾的含量较高,这是受未断流时期流域中上游农业耕作钾盐顺流而下的影响,这也是罗布泊钾盐矿的成因之一。总体来看孔雀河下游土壤养分大多数属于贫瘠范围,养分含量低,表明研究区土壤贫瘠,缺乏养分。

根据国际制土壤颗粒成分分级标准[25],对土壤颗粒组成进行分析可知,颗粒组成中砂粒>粉粒>粘粒,0—15 cm 土层砂粒所占比重处于 55%—85%之间,粉粒在 0%—45%之间,粘粒在 0%—15%之间,属于砂质壤土,15—30 cm 土层粉粒所占比重有所提高,砂粒比重下降,属于砂质壤土或粉砂质壤土。总体来看,孔雀河下游土壤属于砂质壤土,土壤通气性、透水性较好,但保肥性差,其中盐土荒漠化类型较为特殊,距河道 100 m 处 0—15 cm 土层砂粒所占比重在各样地中最高,到 15—30 cm 达到 100%,说明盐土荒漠化类型近河道土壤沙漠化较严重。

3.3 不同退化类型下的种间关系

3.3.1 植物种间联结性

以同类型样地为整体,计算 *VR* 值得出每类生态类型的总体联结性(表 3)。其中,绿洲-荒漠过渡类型和

盐土荒漠化类型的物种在总体上表现为显著正联结,且盐土荒漠化类型的联结性强于绿洲-荒漠过渡类型,轻度荒漠化类型种群在总体上表现为不显著的负联结。复合联结系数 *VR* 为多物种间总体联结性衡量指标,对种对间“正”或“负”或相互独立的关系难以反映,因此针对种对间联结性作进一步分析。

表 2　不同退化类型土壤养分与颗粒组成对比

Table 2　Soil nutrients and particle composition between different the degenerate sections

项目 Item			绿洲-荒漠过渡类型 Oasis-desert ecotone	轻度荒漠化类型 Intermediate desertification zone	盐土荒漠化类型 Saliniferous desertification zone
养分 Nutrient	有机质 Organic matter/(g/kg)		7.55±2.65a	6.98±2.57a	1.52±0.22a
	速氮 Available nitrogen/(mg/kg)		50.35±15.30a	35.57±10.10a	36.64±7.90a
	速钾 Available potassium/(mg/kg)		978.45±379.11a	837.56±220.75a	428.36±99.18a
	速磷 Available phosphorus/(mg/kg)		13.57±4.97a	10.53±3.59a	3.52±0.48a
	全氮 Total nitrogen/(g/kg)		0.41±0.26a	0.15±0.03a	0.09±0.01a
	全磷 Total phosphorus/(g/kg)		2.01±0.04a	2.03±0.07a	1.66±0.09b
	全钾 Total potassium/(g/kg)		16.30±1.82a	15.58±0.28a	14.10±0.30a
距河道 100 m 土壤颗粒/% Soil particle	0—15 cm 土层	粘粒(<0.002 mm)	3.04	2.17	2.04
		粉粒(0.002—0.02 mm)	18.59	14.53	12.34
		砂粒(0.02—2 mm)	78.37	83.31	85.62
	15—30 cm 土层	粘粒(<0.002 mm)	5.66	2.44	4.78
		粉粒(0.002—0.02 mm)	36.56	15.39	42.12
		砂粒(0.02—2 mm)	57.78	82.17	53.10
距河道 800 m 土壤颗粒/% Soil particle	0—15 cm 土层	粘粒(<0.002 mm)	6.01	3.41	0.00
		粉粒(0.002—0.02 mm)	36.40	21.83	0.00
		砂粒(0.02—2 mm)	57.59	74.75	100
	15—30 cm 土层	粘粒(<0.002 mm)	7.66	2.53	5.73
		粉粒(0.002—0.02 mm)	60.15	15.18	49.14
		砂粒(0.02—2 mm)	32.19	82.29	45.13

平均值±标准误,表中同列不同字母表示在 0.05 水平上差异显著

表 3　不同退化类型总体联结性分析

Table 3　Analysis of total overall association between different the degenerate sections

类型 Types	方差比率 *VR* Variance ratio	检验统计量 *W* Test statistics	X^2临界值($X^2_{0.95,N}$,$X^2_{0.05,N}$) X^2 critical value	测度结果 Measure results
绿洲-荒漠过渡类型 Oasis-desert ecotone	1.86	37.19	(10.85,31.41)	显著正联结
轻度荒漠化类型 Intermediate desertification zone	0.86	17.14	(10.85,31.41)	不显著负联结
盐土荒漠化类型 Saliniferous desertification zone	3.07	61.50	(10.85,31.41)	显著正联结

对比 3 种退化类型的种对间种间联结系数(表 4—表 6)可以看出,物种间大多数表现为不显著的一般联结,以独立的形式共存。其中,绿洲-荒漠过渡类型中 12 个物种的 66 个种对组合中,有 31 对是正联结,33 对负联结,2 对完全独立。轻度荒漠化类型中 9 个物种的 36 个种对组合中,有 16 对是正联结,20 对负联结。盐土荒漠化类型中 9 个物种的 36 对种对组合中,有 25 对是正联结,10 对负联结,1 对完全独立。3 种生境类型相对应的种对中,正联结种对所占比例分别为 47%、44.4%、69.4%,负联结种对数所占的比例分别为 50%、55.6%、27.8%,绿洲-荒漠过渡类型正联结种对数与负联结种对数相差不大,种对间正负联结比 0.94<1,轻度荒漠化类型正联结种对数小于负联结种对数,种对间正负联结比为 0.8<1,盐土荒漠化类型正联结对数明显多于负联结对数,种对间正负联结比为 2.5>1,3 种生境类别中盐土荒漠化类型正联结种对数最多。从不同退

化状态下物种的种间联结性来看,断面中表现为极显著或显著联结的种对数较少,绿洲-荒漠过渡类型中仅有7对表现为显著联结,轻度荒漠化类型中仅有3对,盐土荒漠化类型中有1对表现为极显著相关,5对表现为显著相关,大多数表现为一般相关。

表4 绿洲-荒漠过渡类型物种 χ^2 测定矩阵表

Table 4 The χ^2 mensuration matrix of Oasis-desert ecotone

种编号 Species No.	S1	S10	S2	S4	S5	S12	S14	S13	S11	S15	S16
S10	+0.35										
S2	+0.20	+1.27									
S4	+1.87	+0.00	+0.03								
S5	+4.49*	+0.35	−0.20	+1.87							
S12	+4.49*	+0.35	−0.20	+1.87	+4.49*						
S14	−0.00	−0.00	0.24	−0.56	−0.00	−0.00					
S13	+0.20	−0.00	+0.56	−0.03	−0.20	−0.20	+5.95*				
S11	+1.87	−0.00	−0.03	−0.56	−1.87	−1.87	+0.56	+0.03			
S15	+4.49*	−0.35	+0.20	+1.87	−4.49*	−4.49*	−0.00	−0.20	−1.87		
S16	+1.87	−0.00	+0.03	−0.56	−1.87	−1.87	+0.56	+0.03	+0.56	−1.87	
S6	−0.59	0.42	+2.51	−0.03	−0.59	−0.59	+2.81	+2.51	−0.03	−0.59	+0.03

+表示正联结($ad>bc$),-表示负联结($ad<bc$),无符号为完全独立;* $P<0.05$; ** $P<0.01$

表5 轻度荒漠化类型物种 χ^2 测定矩阵表

Table 5 The χ^2 mensuration matrix of Intermediate desertification zone

种编号 Species No.	S1	S2	S4	S14	S16	S10	S13	S11
S2	+1.80							
S4	+0.00	+1.07						
S14	+0.81	+3.23	−0.07					
S16	−0.88	−7.91*	−1.83	−0.38				
S10	−4.27*	−0.00	+0.09	−0.61	−0.07			
S13	−0.00	−0.00	−0.35	+0.01	+0.10	+0.35		
S11	−1.57	+0.00	+1.18	−1.14	−0.52	+6.41*	−1.01	
S6	−0.00	+0.00	+0.35	−0.01	−0.10	+0.35	−4.49	+1.01

+表示正联结($ad>bc$),-表示负联结($ad<bc$),无符号为完全独立;* $P<0.05$; ** $P<0.01$

表6 盐土荒漠化类型物种 χ^2 测定矩阵表

Table 6 The χ^2 mensuration matrix of Saliniferous desertification zone

种编号 Species No.	S10	S6	S7	S8	S3	S2	S9	S16
S6	+1.99							
S7	+2.76	+1.05						
S8	+2.76	+1.05	+16.05**					
S3	+0.30	+0.73	+3.58	+3.58				
S2	+0.52	+1.11	+4.84*	+4.84*	+0.17			
S9	+0.52	+0.01	+4.84*	+4.84*	+0.17	+4.06*		
S16	+1.01	−0.59	+0.04	+0.04	−0.20	−0.10	+0.10	
S11	−0.13	0.42	−0.28	−0.28	−0.00	−0.07	−0.07	−0.35

+表示正联结($ad>bc$),-表示负联结($ad<bc$),无符号为完全独立;*代表 $P<0.05$; **代表 $P<0.01$

3.3.2 种间联结的类群差异

CCA 排序结果见图6,第一排序轴特征值为0.895,第二排序轴特征值为0.696,前两个排序轴的特征值占总特征值的58%,说明排序效果良好;并且前两轴物种与环境相关系数为0.997和0.989,相关性很高。第一

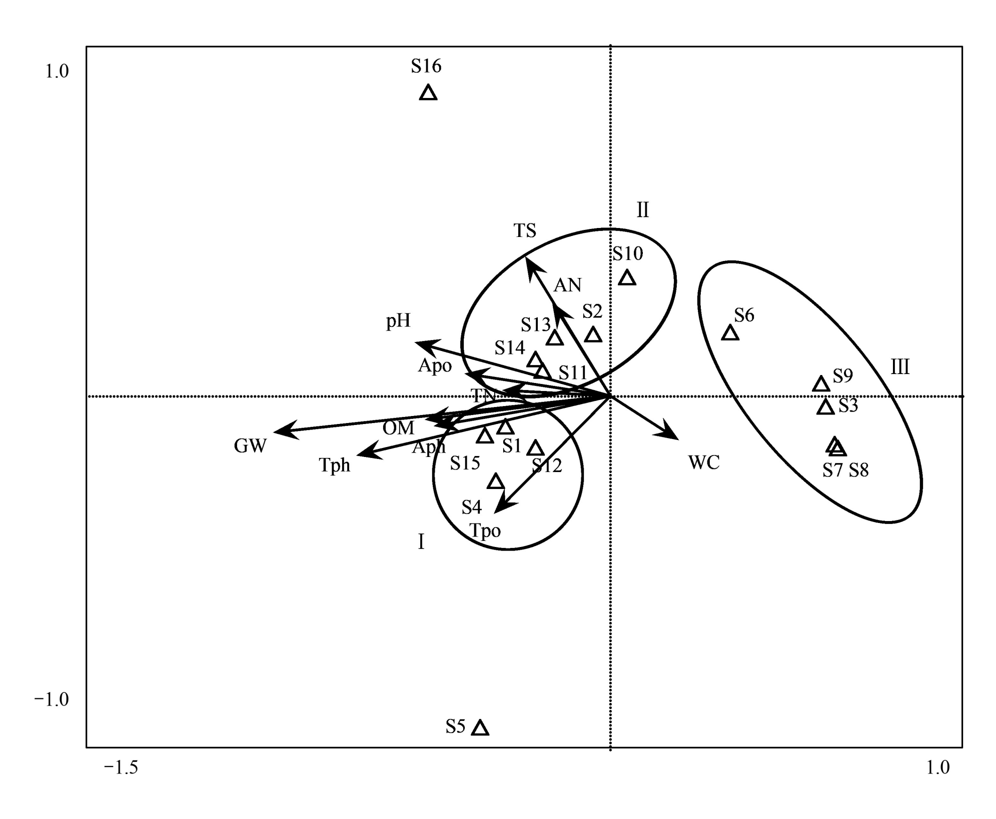


图 6　物种 CCA 二维排序图

Fig.6　A two-dimensional scatter plot of CCA ordination for plant species

各物种编号见表 1Species codes expressed in table 1;OM:有机质平均值 average of organic matter;Tph:全磷平均值 average of total phosphorus;Tpo:全钾平均值 average of total potassium; Apo:速钾平均值 average of available potassium;pH:酸碱度平均值。TS:总盐平均值 average of total salt; GW:各样地地下水埋深 ground water;TN:全氮平均值 average of total nitrogen;AN:速氮平均值 average of available nitrogen;Aph:速磷平均值 average of available phosphorus;WC:土壤含水量 water content

排序轴除与含水量呈正相关外,与其它环境因子均呈负相关,其中与地下水埋深、pH、有机质、全磷、速磷、速钾呈较强的负相关,相关系数依次为-0.9676、-0.5684、-0.5346、-0.7247、-0.4916、-0.4195,第二排序轴与总盐量呈正相关(0.4011),与其余环境因子相关性较小,地下水埋深、含水量、有机质、全磷、全钾、速磷呈负相关,pH、全氮、速氮、速钾为正相关,故在 CCA 排序图中,沿第一排序轴从左到右,地下水埋深逐渐变浅,pH 值变小,有机质、全磷等土壤养分含量逐渐降低,沿第二排序轴从下至上,土壤总盐量增加。

由图 6 可知,按照分布位置及密集程度断流河道物种可分为三大类群,图中以Ⅰ类、Ⅱ类、Ⅲ类表示。其中,Ⅰ类包括胡杨、猪毛菜、牛皮消、胀果甘草(S1,S4,S15,S12),Ⅱ类物种为多枝柽柳、甘草、黑刺、刚毛柽柳、铃铛刺(S11,S13,S2,S10,S14),Ⅲ类为盐穗木、花花柴、白刺、盐爪爪和盐节木(S6,S9,S3,S7,S8)。Ⅰ类群物种偏向图左侧,所处环境的土壤养分较高,地下水位、土壤 pH 和盐分含量适中,Ⅱ类群物种所处环境土壤养分、水分等含量普遍低于Ⅰ类,Ⅲ类群物种偏向图右侧,所在环境土壤养分含量最低,土壤贫瘠,地下水位浅。结合前文分析可知,Ⅰ类群物种及环境特征符合绿洲-荒漠过渡化类型,Ⅱ类群符合轻度荒漠化类型,Ⅲ类群符合盐土荒漠化类型。从种间联结的角度可以看出,Ⅰ类群中物种胡杨(S1)处于中间位置,各物种与胡杨间的距离相当,联系亲密,形成以胡杨为主的显著联结。Ⅱ类群中,刚毛柽柳(S10)、多枝柽柳(S11)、黑刺(S2)等物种与胡杨距离较远,联结性较弱,而圈内物种间距离较短,关系亲密,依赖性增强,形成以柽柳为主的物种间的显著联结。Ⅲ类群,物种则以盐节木(S8)、盐爪爪(S7)、盐穗木(S6)等真盐生植物距离近,这些多年生半灌木常紧密联系,形成正联结特征显著。

4　讨论

4.1 断流河道地下水变化

在干旱内陆河流域,河道水的侧渗是地下水最主要的补给源。王希义等[26]对塔里木河下游垂直河道范围地下水变化研究得出,随垂直河道距离的增大,地下水埋深呈逐渐增大的趋势,这是因为在河道水侧渗补给的情况下,远离河道处接受的补给较少。而文中研究结果表明,孔雀河下游绿洲-荒漠过渡类型地下水埋深表现为距离河道近处较深、远河道处较浅的特点,轻度荒漠化类型地下水埋深,不受垂直河道远近变化影响,这与王希义的研究结果不一致,是由于孔雀河下游河道断流,河水补给两侧地下水的能力大为下降,地下水埋深受河水的影响作用也减弱。其中,绿洲-荒漠过渡类型受当地农业活动的影响,农田灌溉水成为地下水的补给源,使得远河道地下水位高于近河道。轻度荒漠化类型地下水既无河水补给,也无人为补给源的情况下,主要受土壤和植被影响,各样地监测井地下水位差异不大。陈亚宁等[27]在对塔里木河下游断流河道地下水位分析时发现,在顺沿河道方向从上到下,随着断流时间增加,地下水位呈现明显下降的变化趋势,即越接近尾闾地下埋深越大。而孔雀河下游断流河道,接近尾闾的盐土荒漠化断面地下水埋深在 2.0—3.0 m 之间,远远高于近水源的监测断面,这是由于 35 团北山引水管道在此段有渗漏,在附近形成了一定面积的水坑,从而促使地下水位抬升,同时增加了表层土壤的盐分;另外,此监测断面接近孔雀河尾闾,海拔高度较低,属开孔河、塔里木河流域地势低洼处,也是地下水汇集场所,故此断面地下水埋深较小。由此可见,孔雀河下游的断流河道,因北邻天山地势较塔里木河下游要高,在河道水位高于补给区域的情况下,必会向南边荒漠区补给侧渗,同时向东边低地势处汇集,加之周边农田灌溉及引水管道等人为因素的影响下,表现出与塔里木河下游断流河道不同的地下水位变化趋势。

4.2 断流河道盐分变化

研究区土壤总盐在表层土壤中的含量较大,在 0—50 cm 的土层呈现较大波动,而 50 cm 以下土层盐分含量较小,波动性也较小,这与杨玉海等[28]对塔里木河下游土壤总盐特性研究结果相似。其原因一方面是植被对上层土壤理化性质影响较大[29];另一方面,研究区降雨少,缺乏水溶性盐向深层的淋溶,加之下层土壤中可溶性离子在强烈蒸发下上升,使土壤水溶性盐在表层集聚,导致土壤水溶性总盐含量随土层深度的增加呈逐步降低的趋势。值得注意的是,3 种生境类型中,盐土荒漠化类型盐分含量最高,其原因为盐土荒漠化类型接近河尾闾处,地下水埋深较浅,在强烈日照下,蒸发量大,因没有河道淡水的及时补给,使得含盐量在 3 种生境类型中最高,印证了张道远等[30]学者指出的新疆盐土处于地下水位较高的低地内,盐分与高位浅层地下水并存的研究成果。

4.3 种间正负联结比与生态稳定性

韩路等[31]研究塔里木荒漠绿洲过渡带发现,种对间正负联结比<1,群落总体联结性为显著负联结,优势种种对间均表现出显著负联结,种间存在对资源的激烈竞争而使群落处于不稳定的演替阶段;而孔雀河下游断流河道的绿洲-荒漠过渡类型种对间正负联结比<1,总体联结性却表现为显著正联结,与韩路研究结果不完全一致。本研究区绿洲-荒漠过渡类型正联结对数中,胡杨与其他物种间正联结占 1/3 左右,魏庆莒[32]指出,胡杨通过树冠的蔽荫覆盖,减缓土壤上层水分的直接蒸发,抑制土壤盐渍化的进程,进而为周围地区的其他物种创造定居条件。分析表 4 可知,此生境下的建群种胡杨与绝大多数物种成正联结关系,并与胀果甘草、牛皮消等成显著正联结,受建群种胡杨影响,群落总体联结性为显著正联结。但绿洲-荒漠过渡类型种对间正负联结比小于 1,种对间多表现负联结,生态系统表现为不稳定状态,这种状态中建群种对环境的主导作用仍然存在,为潜在退化状态。

杜道林[33]认为,随着群落演替的进行,群落结构及其种类组成将逐渐趋于稳定,种间关系也将趋于正联结以求得多物种共存。同时,Moore P D[34]指出,正的联结可以指示种群间相互作用的存在对一方或双方是有利的,负的联结表明种群之间不利于一方或双方种的相互作用机制。盐土荒漠化类型种对间正负联结比为 2.5>1,正联结对数明显多于负联结对数,正联结的种对以盐穗木、盐爪爪、盐节木和花花柴的两两联结为主,说明在重度退化环境下,真盐生植物彼此相互影响,互利共存,群落种类组成趋于稳定,共同维持重度退化生

境的生态平衡。受优势种盐穗木、盐爪爪、盐节木和花花柴之间的正联结影响,盐土荒漠化类型总体联结性为显著正联结。

4.4 断流河道群落结构变化

本研究 CCA 图中,胡杨所处位置的垂直延伸线位于有机质、地下水位以及盐分的线段中间,这与尹林克等[9]对塔里木河中下游地区荒漠河岸林群落物种排序结果一致,表明干旱区胡杨对地下水位、盐分及养分的耐受能力适中,绿洲-荒漠过渡类型各物种与胡杨距离较近,形成以胡杨为中心的显著联结,胡杨在群落中保持了优势地位及建群种的作用。刚毛柽柳与多枝柽柳的联结性较为特殊,在轻度荒漠化类型表现为显著正联结,而在盐土荒漠化类型表现为负联结。轻度荒漠化类型地下水埋深大、养分相对较高、盐分相对较低,刚毛柽柳和多枝柽柳在此生境共有资源充分,产生生态位重叠,种对间表现为正联结。楚光明等[35]研究得出:在具有负联结关系或负联结关系显著的种对中,负联结关系反映出了这些种对对生境要求差异较大或在资源利用上形成了竞争关系。在盐土荒漠化类型刚毛柽柳和多枝柽柳在对土壤养分资源竞争的同时又受盐分胁迫,共有资源缺乏,种对间互相影响而彼此排斥,表现为负联结。盐土荒漠化类型物种多为一些真盐生植物如盐爪爪、盐节木、盐穗木等,其中盐爪爪多生于膨松盐土和盐渍化的低沙地,盐节木具有抗盐、抗旱的生态学特性,有学者研究指出[36],盐穗木在地下水位 2—3 m 的盐土,尤其是柽柳破坏后,盐分集积的环境下,逐渐形成优势群落。盐土荒漠化类型地下水埋深浅,养分含量低,盐分含量高,土壤沙漠化严重,此生境形成以优势种盐爪爪、盐节木、盐穗木等真盐生植物为中心的正联结。

5 结论

(1)孔雀河下游断流河道存在不同程度的退化类型,通过聚类分析可将退化生境分为绿洲-荒漠过渡类型、轻度荒漠化类型和盐土荒漠化类型。在没有表水的正常补给下,绿洲-荒漠过渡类型的地下水埋深受农业灌溉的影响,垂直河道方向上近河道地下水埋深较深而远河道较浅;盐土荒漠化类型受地形与北山引水的影响,顺沿河道方向上接近尾闾地下水埋深较浅。在地势低洼与北山引水管道的双重影响下,接近尾闾的盐土荒漠化生境成为盐分的聚集区。

(2)绿洲-荒漠过渡类型总体联结性为显著正联结,正负联结比小于 1,生态系统表现为建群种维系生态关系的不稳定状态;轻度荒漠化类型总体联结性为不显著负联结,正负联结比小于 1,表现出生态系统进入退化演替的阶段;盐土荒漠化类型总体联结性为显著正联结,正负联结比大于 1,生态系统群落种类组成趋于稳定,物种间互利共存,其中,真盐生植物对于重度退化生境的生态维持起着重要的作用。

(3)绿洲-荒漠过渡类型各物种与胡杨距离较近,形成以胡杨为中心的显著联结,胡杨在群落中保持了优势地位及建群种的作用;而在轻度荒漠化类型中,物种间总体呈不显著负联结,但刚毛柽柳与多枝柽柳在此生境中表现为显著正联结;盐土荒漠化生境形成以盐爪爪与盐节木为中心的显著正联结,而此生境下的刚毛柽柳和多枝柽柳则表现为不显著负联结。

参考文献(References):

[1] 李卫红, 郝兴明, 覃新闻, 陈亚宁, 黄湘. 干旱区内陆河流域荒漠河岸林群落生态过程与水文机制研究. 中国沙漠, 2008, 28(6): 1113-1117.

[2] 郝兴明, 李卫红, 陈亚宁. 新疆塔里木河下游荒漠河岸(林)植被合理生态水位. 植物生态学报, 2008, 32(4): 838-847.

[3] 郑丹, 李卫红, 陈亚鹏, 刘加珍. 干旱区地下水与天然植被关系研究综述. 资源科学, 2005, 27(4): 160-167.

[4] 周先叶, 王伯荪, 李鸣光, 昝启杰. 广东黑石顶自然保护区森林次生演替过程中群落的种间联结性分析. 植物生态学报, 2000, 24(3): 332-339.

[5] 张继强, 陈文业, 康建军, 袁海峰, 刘冬皓, 王海. 甘肃敦煌西湖湿地芦苇群落种间关联性研究. 西北植物学报, 2014, 34(2): 358-363.

[6] 任彩勤, 白玉宏, 杨晓凤, 毕润成. 山西牛奶子群落优势种种间关联性研究. 生物学杂志, 2013, 30(6): 41-44, 49-49.

[7] 李亚, 王辉, 刘世增, 朱国庆, 胡小柯, 李得禄, 吴春荣. 民勤荒漠区霸王群落种间联结性分析. 中国农学通报, 2012, 28(19): 22-28.

[8] 邓莉萍, 白雪娇, 李露露, 牛沙沙, 韩美娜, 秦胜金, 周永斌. 辽东山区次生林优势木本植物种间联结与相关分析. 生态学杂志, 2015,

34(6)：1473-1479.
[9] 尹林克，李涛. 塔里木河中下游地区荒漠河岸林群落种间关系分析. 植物生态学报，2005，29(2)：226-234.
[10] 王长建，张小雷，杜宏茹，汪菲. 开都河－孔雀河流域水资源承载力水平的综合评价与分析. 冰川冻土，2012，34(4)：990-998.
[11] 金花. 巴州孔雀河中下游常年断流情况及水资源管理探讨. 现代农业科技，2014，(2)：232-233.
[12] 石瑞花，李霞，尹业彪，董新光. 孔雀河流域天然植物多样性与地下水关系. 资源科学，2009，31(9)：1553-1560.
[13] 王铁成，谢红彬，贾宝全. 孔雀河流域绿洲生态支持系统调控模式研究. 干旱区资源与环境，2002，16(3)：7-11.
[14] 王水献. 开孔河流域绿洲水土资源开发及其生态环境效应研究[D]. 乌鲁木齐：新疆农业大学，2008.
[15] 尹业彪，李霞，郭玉川，董新光. 孔雀河畔土壤盐分空间变异及格局分析. 新疆农业大学学报，2010，33(3)：244-249.
[16] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京：中国农业科技出版社，1999：12-195，266-292.
[17] 张悦，郭利平，易雪梅，曹伟，王远遐，吴培莉，姬兰柱. 长白山北坡3个森林群落主要树种种间联结性. 生态学报，2015，35(1)：106-115.
[18] 董大颖，范宗骥，李扎西姐，陈卓琳，王敏增，王奇峰，李凯，关文彬. 北京西山地区大山雀与其它鸟类种群种间联结分析. 生态学报，2013，33(20)：6614-6633.
[19] 刘朝霞，李钢铁，李玉灵. 用聚类分析法进行毛乌素风蚀荒漠化强度分级－以乌审旗为例. 内蒙古林学院学报：自然科学版，1996，18(1)：27-33.
[20] 黄润龙，管于华. 数据统计分析-SPSS原理及应用. 北京：高等教育出版社，2010：242-271.
[21] 徐建华. 现代地理学中的数学方法. 2版. 北京：高等教育出版社，2002：71-71.
[22] 陈永金，刘加珍，陈亚宁，李新功，朱海勇. 输水前后塔里木河下游物种多样性与水因子的关系. 生态学报，2013，33(7)：2212-2224.
[23] 刘加珍，李卫红，吴纯渊，陈永金. 荒漠河岸生态系统退化与物种多样性恢复研究. 干旱区研究，2009，26(2)：212-220.
[24] 新疆维吾尔自治区农业厅，土壤普查办公室. 新疆土壤. 北京：科学出版社，1996：46-61.
[25] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析. 上海：上海科学技术出版社，1978：469-480.
[26] 王希义，徐海量，潘存德，凌红波. 塔里木河下游地下水埋深对草本植物地上特征的影响. 生态学杂志，2015，34(11)：3057-3064.
[27] 陈亚宁，李卫红，徐海量，刘加珍，张宏峰，陈亚鹏. 塔里木河下游地下水位对植被的影响. 地理学报，2003，58(4)：542-549.
[28] 杨玉海，陈亚宁，李卫红. 塔里木河下游土壤特性及荒漠化程度研究. 水土保持学报，2007，21(1)：44-49.
[29] 郑田，李建贵，李卫红，湾疆辉. 塔里木河下游绿洲荒漠过渡带土壤异质性及对植物群落的影响. 中国沙漠，2010，30(1)：128-134.
[30] 张道远，杨维康，潘伯荣，尹林克. 刚毛柽柳群落特征及其生态、生理适应性. 中国沙漠，2003，23(4)：446-451.
[31] 韩路，王海珍，王家强，郝文芳. 塔里木荒漠绿洲过渡带植物种间关联性分析. 生态环境学报，2015，24(6)：932-937.
[32] 魏庆莒. 胡杨. 北京：中国林业出版社，1990：43-43.
[33] 杜道林，刘玉成，李睿. 缙云山亚热带栲树林优势种群间联结性研究. 植物生态学报，1995，19(2)：149-157.
[34] Moore P D，Chapman B C. Methods in Plant Ecology. 2rd ed. Oxford：Blackwell Scientific Publications，1986：462–465.
[35] 楚光明，潘存德，万猛，晋瑜，蒙敏，何江成. 克拉玛依农业综合开发区外围主要荒漠植物种间联结测定分析. 新疆农业大学学报，2004，27(4)：1-6.
[36] 唐麓君. 治沙造林工程学. 北京：中国林业出版社，2005：635-635.